STRAHLUNGS-, TEMPERATUR- UND POTENTIALMESSUNGEN IN ENTLADUNGSRÖHREN BEI STARKEN STRÖMEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

FRIEDRICH-ALEXANDERS-UNIVERSITÄT ERLANGEN

VORGELEGT

VON

HANS GEIGER

AUS NEUSTADT A. D. H.

TAG DER MÜNDLICHEN PRÜFUNG:
23. JULI 1906

LEIPZIG,
JOHANN AMBROSIUS BARTH.
1906.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

MEINEN LIEBEN ELTERN.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41542702_0123

§ 1. Einleitung.

Will man durch ein verdünntes Gas einen kontinuierlichen, elektrischen Strom schicken, so war man bisher auf Influenzmaschinen und Hochspannungsbatterien bez. auf Hochspannungsdynamos und Hochspannungskondensatoren angewiesen, weil nur diese die nötigen Spannungen liefern. Diese Stromquellen geben aber nur relativ geringe Elektrizitätsmengen, so daß alle Untersuchungen der stetigen Glimmentladung — einige spezielle Fälle ausgenommen[1]) — in bezug auf das Maximum der angewendeten Stromstärke sehr beschränkt waren.

Neuerdings hat A. Wehnelt[2]) gezeigt, daß der Kathodenfall an einer Platinelektrode, die mit einer Oxydschicht des Baryums, Strontiums oder Calciums bedeckt ist, verschwindet, wenn diese Kathode stark erhitzt ist. Der Gesamtpotentialabfall in einem solchen, mit einer Oxydkathode versehenen Rohr setzt sich dann nur aus dem Potentialabfall auf der positiven Säule und dem Anodenfall zusammen. Man kann ein solches Rohr, wenn es genügend weit ist und wenn man bei tiefen Drucken arbeitet, mit Starkstromleitungen von 110 und 220 Volt betreiben.[3]) Bei einer derartigen Stromquelle kann man Ströme bis zu mehreren Ampère, also Ströme, die die früheren bis hundertmal an Intensität übertreffen, durch ein Entladungsrohr schicken. Dabei ist die Glimmentladung immer vollkommen stetig.

1) Aus der Technischen Reichsanstalt liegen Untersuchungen mit einer Hochspannungsbatterie bis zu beträchtlichen Stromstärken vor: E. Gehrke, Ann. d. Phys. **15.** p. 509. 1904.

2) A. Wehnelt, Ann. d. Phys. **14.** p. 425. 1904.

3) A. Wehnelt, Zeitschr. f. phys. u. chem. Unterr. **18.** p. 193. 1905; Phys. Zeitschr. **5.** p. 680. 1904.

Bei solchen starken Strömen habe ich Messungen über die Strahlung, die Temperatur und den Potentialgradienten im positiven Lichte ausgeführt.

§ 2. Versuchsanordnung.

Die Entladungsröhren hatten im allgemeinen die Gestalt von Figur 1.

Die Kathode K war eine Platinfolie von 0,01 mm Dicke und einer Gesamtoberfläche von etwa 2 qcm, die gleichmäßig mit einer CaO-Schicht bedeckt wurde. Als Zuleitungen zur Kathode dienten etwa 2 mm starke Kupferdrähte, die in die Rohransätze E_1 und E_2 mittels Siegellack eingekittet waren. Über diese Kittstellen war ca. 5 cm hoch Quecksilber gegossen. Etwaige Zersetzungsprodukte des Siegellacks waren durch diese Anordnung abgehalten. Der weite Quecksilberschliff H ermöglichte es, das Kathodenblech, wenn es durchgebrannt war, in einfacher Weise durch ein neues zu ersetzen. Bei den meisten Messungen waren gleich von vornherein 2 bis 3 Bleche an getrennten Zuleitungen als Kathoden in das Rohr eingeführt, die nacheinander benutzt wurden. Man war so beim Durchbrennen eines Blechs nicht genötigt, den Schliff herauszunehmen. Die Platinfolie wurde durch eine Akkumulatorenbatterie aus vier Elementen von großer Kapazität bis zur Weißglut erhitzt. Es waren hierzu 8—10 Ampère nötig.

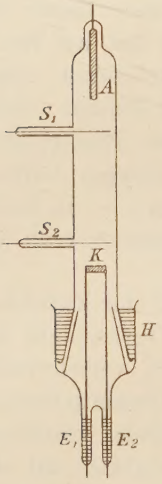

Fig. 1.

Als Anode A konnten nur stärkere Drähte eines schwerschmelzbaren Materials Verwendung finden, da die Wärmeentwickelung dicht an der Anode, wie bereits A. Wehnelt[1]) in der zitierten Arbeit ausführt, eine recht beträchtliche ist. Selbst Eisendrähte, die in einer Stärke von 6 mm bei den vorliegenden Versuchen verwendet wurden, erhitzten sich unter Umständen bis zu heller Rotglut.

1) A. Wehnelt, Ann. d. Phys. **14.** p. 457. 1904.

Zwei Sonden S_1 und S_2 aus dünnem Platindraht, die in einem Abstand von 10 cm in das Rohr eingeschmolzen waren, gestatteten Potentialmessungen auf der positiven Säule. Als Meßinstrument diente ein Warburgsches Quadrantelektrometer in der von E. Wiedemann und G. C. Schmidt gegebenen Modifikation.[1])

Den Hauptstrom für das Rohr lieferte die hiesige, städtische Zentrale (Dreileiter 2 × 220 Volt). Für die meisten Versuche waren 220 Volt ausreichend, nur gelegentlich bei höheren Gasdrucken kamen 440 Volt zur Verwendung. Die Stromstärke ließ sich durch einen Glühlampenwiderstand von 9 parallel schaltbaren 220 Voltlampen in weiten Grenzen verändern. Ein Präzisionsampèremeter von Reiniger & Co., München, war in diesen Stromkreis eingeschaltet.

Zum Evakuieren diente eine Sprengelsche Fallluftpumpe; ein Mac Leod-Manometer war zu Druckmessungen angeschlossen; die verwendeten Schliffe und Hähne waren ausschließlich mit Quecksilber gedichtet.

Die untersuchten Gase waren atmosphärische Luft, Stickstoff und Wasserstoff. Die Füllung des Rohres geschah in der folgenden Weise: Nachdem das Rohr das erstemal ausgepumpt war, wurde einige Minuten lang unter fortwährendem, gleichzeitigem Auspumpen ein Strom von 1—1,5 Ampère durch das Rohr geschickt. Die Glaswände erhitzten sich hiedurch sehr stark, so daß sich die an den Glaswänden adsorbierten Gase zum größten Teil loslösten. Dann wurde das Gas bis zu einem Druck von ca. 15 mm eingelassen. Dieser ganze Vorgang wurde mehrmals wiederholt. Von vollkommen reinen Gasen kann allerdings trotz aller Vorsichtsmaßregeln nicht gesprochen werden. Vor allem gelang es nicht, die Quecksilberdämpfe vollkommen abzuhalten; dann wirkte auch sehr störend, daß die Elektroden, namentlich die stark erhitzte Eisenanode immer wieder große Mengen okkludierter Gase abgaben.

Will man bei der Untersuchung der Spektralerscheinungen fremde Gase möglichst abhalten, so mußten besondere Vor-

1) E. Wiedemann u. G. C. Schmidt, Wied. Ann. 66. p. 314. 1898.

sichtsmaßregeln getroffen werden, deren Beschreibung hier zu weit führen würde. Erst nach Abschluß der beschriebenen Versuche gelang es, solche Anordnungen aufzufinden.[1]) Die kleinen Mengen fremder Gase, die bei den folgenden Versuchen zugegen waren, trübten, wie besondere Versuche zeigten, die mitgeteilten Resultate nicht.

Über die Entladungsform im allgemeinen ist folgendes zu bemerken. Bei allen angewendeten Drucken bildeten sich die Schichten auffallend scharf aus. Der Schichtenabstand ist annähernd gleich der Rohrweite, wächst aber mit abnehmendem Gasdruck, allerdings nur wenig.[2]) Ändert man die Stromstärke innerhalb 0,1 — 1 Ampère, so ändert sich die Entfernung der Schichten nicht. Man hat bereits den konstanten Wert erreicht, dem nach Willow u. a.[3]) der Schichtenabstand mit wachsender Stromstärke zuzustreben scheint. Außer dieser normalen Schichtung konnte man ausnahmsweise auch beobachten, daß eine weit größere Zahl scheibenförmiger Schichten auftrat, die dicht aneinander lagen. Von was für besonderen Bedingungen das Auftreten dieser Art Schichtung abhängt, ließ sich nicht feststellen.

Die Entladung sah in Luft und Stickstoff bei geringer Stromstärke orangerot, bei gesteigerter Stromintensität gelb aus.[4])

Bei Wasserstoff zeigte sich oft recht deutlich ausgeprägt die verschiedenfarbige Schichtung, die bereits von Crookes[5]) beobachtet wurde und von Quecksilberdämpfen herrührt.

---

1) Im hiesigen Institut sind Untersuchungen dieser Art noch im Gange, die in Bälde veröffentlicht werden.

2) Goldstein, Wied. Ann. **15.** p. 277. 1882.

3) Literatur vgl. J. J. Thomson, Elektrizitätsdurchgang in Gasen übers. v. E. Marx p. 480 ff. 1906.

4) Vgl. G. C. Schmidt, Ann. d. Phys. **1.** p. 628. 1900 und Schwienhorst, Diss. Göttingen. p. 18. 1903.

5) W. Crookes, Proc. Roy. Soc. p. 399. 1902.

I. Strahlungsmessungen.

§ 3. Die Abhängigkeit der Strahlung von der Stromstärke.

Es wurde gemessen einerseits die Gesamtstrahlung des leuchtenden Gases, andererseits die Gesamtlichtstrahlung allein, nämlich die Strahlung, die von einer die Wärmestrahlung absorbierenden Substanz durchgelassen wurde. Für schwache Ströme sind Messungen dieser Art bereits von K. Ångström[1]) ausgeführt worden.

Die Gesamtstrahlung des vom Strome durchflossenen Rohres wurde mittels einer Thermosäule von 18 Konstantan–Eisen-

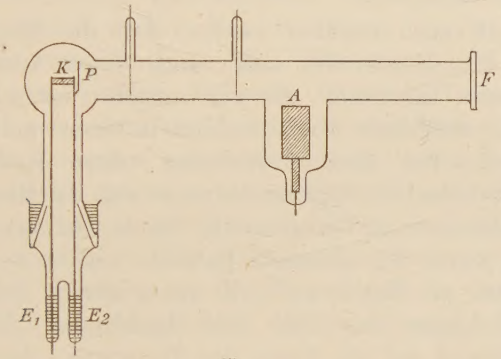

Fig. 2.

elementen bestimmt. Das Entladungsrohr mußte Längsdurchsicht besitzen: es war, wie aus Figur 2 ersichtlich, modifiziert. Anode und Kathode befanden sich in seitlichen Ansätzen. Das den Rohrabschluß bildende Fenster *F* war eine Spiegelglasplatte von 2 mm Dicke, die mittels Natriumsilikat aufgekittet war, um Dämpfe flüchtiger Substanzen zu vermeiden. Die Kittstelle war äußerlich noch durch eine Siegellackschicht geschützt. Von der Verwendung einer Steinsalzplatte, die infolge ihrer hohen Durchlässigkeit für strahlende Energie am geeignetsten gewesen wäre, wurde wegen der starken Hygroskopie des Steinsalzes Abstand genommen. Der Abstand des Fensters von der

1) K. Ångström, Wied. Ann. 48. p. 493. 1893.

Anode betrug 16 cm. Wählt man den Abstand geringer, so beschlägt sich das Fenster allmählich mit einer dünnen Eisenschicht.[1])

Die Thermosäule war in Richtung der Rohrachse 14,5 cm von dem Fenster F entfernt aufgestellt und war durch ein mäßig astasiertes Du Bois-Rubenssches Galvanometer geschlossen. Die Empfindlichkeit dieses Instrumentes betrug $2{,}3 \times 10^{-8}$ Ampère für den Skalenteil bei 100 cm Skalenabstand.

Die Messung der Strahlung geschah in folgender Weise: Ein zwischen dem strahlenden Rohr und der Thermosäule befindlicher Schirm wurde entfernt, der erste Ausschlag des Galvanometers abgelesen und die Thermosäule dann wieder vom Rohre abgesperrt.

Es muß noch erwähnt werden, daß die Strahlung des glühenden Kathodenbleches allein auch einen Ausschlag des Galvanometers hervorrief. Es war zunächst versucht worden, die Kathode außerhalb der Rohrachse in einem weiten Ansatz anzubringen. Bei dieser Anordnung traten jedoch immer diskontinuierliche Lichtbogenentladungen auf: das Blech brannte gleich bei Beginn einer Versuchsreihe durch. Bei den definitiven Versuchen wurde die glühende Kathode wieder in die Rohrachse gesetzt (wie Fig. 2) und mit einem kleinen Schirm P aus Kupferblech gegen das Rohr hin abgeblendet. Dies wirkte weniger störend auf die Form der Entladung; die Strahlung des erwärmten Schirmes war auch relativ gering, nur 4 bis 5 Skalenteile; das sind ca. 8 Prozent des Ausschlags, der bei den Versuchen durchschnittlich gemessen wurde.

In hohem Maße macht sich die Strahlung der erhitzten Rohrwände geltend. Diese Rohrwandstrahlung ist der Stromstärke proportional und kann in folgender Weise bestimmt werden[2]):

Es wird ein starker Strom durch das Rohr geschickt, die Strahlung in Skalenteilen des Galvanometerausschlages be-

1) Derartig beschlagene Glasplatten zeigten ausgeprägte Newtonsche Farbenringe.

2) K. Ångström, Wied. Ann. **48**. p. 506. 1893.

stimmt, der Strom ausgeschaltet und die Abklingung der Rohrstrahlung bestimmt.

Beispiel.

Stickstoff: Stromstärke 0,7 Ampère.

Strahlung	von	Gas	und	Rohr	. . . . .					56	Skt.
„	des	Rohres	allein	10	sec	nach	Ausschaltg.	des	Stromes:	33	„
„	„	„	„	60	„	„	„	„	:	27	„
„	„	„	„	120	„	„	„	„	:	26	„
„	„	„	„	180	„	„	„	„	:	25	„

Aus dieser Tabelle interpoliert man graphisch einen Wert von 36 Skalenteilen für die Rohrwandstrahlung zu der Zeit, als ein Strom durch das Rohr geht.

Zur Bestimmung der Lichtstrahlung benützt Ångström als Wärmestrahlung absorbierendes Mittel eine Alaunplatte. Allerdings haben neuere Untersuchungen ergeben, daß der Alaun nur unvollkommen die Wärmestrahlung absorbiert. R. Zsigmondy[1]) zeigt, daß eine wässerige Eisenoxydulsalzlösung viel geeigneter zur Absorption strahlender Wärme ist. Bei meinen Versuchen wurde Eisenvitriol verwendet und zwar ein Grammolekül gelöst in einem Liter Wasser. Die Lösung läßt nur 1,87 Prozent der Wärmestrahlung durch und erscheint vollkommen farblos.[2]) Die Flüssigkeit wurde in einem parallelepipedischen Glastrog vor die Thermosäule in den Strahlengang gestellt; die Schichtdicke der absorbierenden Lösung betrug 1 cm.

Die durchgeführten Messungen ergaben folgende Sätze für Ströme bis zu einem Ampère:

1. Die Strahlung wächst geradlinig mit der Stromstärke.

2. Das Verhältnis der Lichtstrahlung zur Gesamtstrahlung ist bei konstantem Druck von der Stromstärke unabhängig.

Beide Sätze sind von K. Ångström[3]) bereits aufgestellt worden. Seine Messungen gehen allerdings nur bis zu Strömen von 25 Milliampère.

Die folgende Tabelle 1 enthält Messungen, aus denen sich Satz 1 ergibt. J ist die Stromstärke in Ampère. S ist die

1) R. Zsigmondy, Wied. Ann. 49. p. 531. 1893.
2) R. Zsigmondy, l. c. p. 533.
3) K. Ångström, l. c.

Gesamtstrahlung in Skalenteilen des Galvanometerausschlages, doch ist die Strahlung der Kathode = 4 Skt. jedesmal abgezogen. Die angegebenen Gradienten sind Mittelwerte. Die Kurven der Fig. 3 geben die Zahlenwerte graphisch wieder. Als Abszisse ist die Stromstärke, als Ordinate die Strahlung angetragen. Man erhält gerade Linien, die durch den Nullpunkt gehen.

Tabelle 1.

Stickstoff, Rohr Fig. 2. (Rohrweite 3,2 cm.)

Druck: 0,28 mm Gradient: 5 Volt/cm			Druck: 0,24 mm Gradient: 3,5 Volt/cm			Druck: 0,07 mm Gradient: 1 Volt/cm		
1	2	3	1	2	3	1	2	3
J	S	S/J	J	S	S/J	J	S	S/J
0,05	5	100	0,08	8	100	0,09	7	78
0,19	22	116	0,23	22	96	0,32	27	84
0,40	45	112	0,41	36	88	0,61	44	72
0,61	73	120	0,60	49	82	0,72	56	78
0,77	91	118	0,75	66	88	1,00	71	71
1,00	116	120	1,05	102	97			

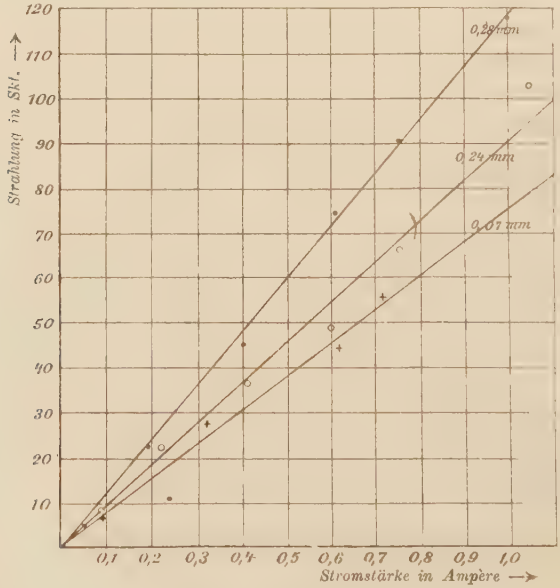

Fig. 3.

Die folgende Tabelle 2 zeigt, daß das Verhältnis der Lichtstrahlung zur Gesamtstrahlung von der Stromstärke unabhängig ist [Satz 2]. S ist die Gesamtstrahlung des Gases (die Strahlung der Rohrwände und der Platinfolie sind in Abrechnung gebracht), S_L ist die Strahlung, die von der $FeSO_4$-Lösung nicht absorbiert wurde. J ist die Stromstärke in Ampère.

Tabelle 2.

Stickstoff, Rohr Fig. 2. (Rohrweite 3,2 cm.)

Druck	J	S	S_L	S_L / S
1	2	3	4	5
konstant = 0,16 mm	0,14	10	6	0,60
	0,26	13	9	0,68
	0,46	17	11	0,64
	0,66	24	14	0,60
	0,85	34	16	0,48

Man ersieht, daß der in Spalte 5 gegebene Quotient S_L/S innerhalb der Versuchsfehlergrenze als konstant gelten kann. Auch bei anderen Drucken ergaben sich dieselben Verhältnisse und derselbe Wert für S_L/S (vgl. auch Tabelle 6 S. 18).

Um die Werte der Strahlung auf Kerzen reduziert zu erhalten, wurden photometrische Messungen in folgender Weise ausgeführt. Von einem Rohre, wie es Figur 1 zeigt, waren Kathode und Anode derart abgeblendet, daß nur noch der zwischen den beiden Sonden liegende 10 cm lange Teil des Rohres sichtbar war. In einer Entfernung von 50 cm wurde die Helligkeit dieses Streifens mittels des Martensschen[1]) Polarisationsphotometers bestimmt. Als Vergleichslichtquelle ist an diesem Photometer eine kleine Glühlampe angebracht, deren Helligkeit mit einer Amylacetatlampe verglichen war. Die Zahlenwerte einer Messungsreihe sind in Tabelle 3 wiedergegeben.

1) F. F. Martens, Phys. Zeitschr. **1.** p. 299. 1900.

Tabelle 3.

Atmosphärische Luft, Rohr Fig. 1. (Rohrweite 2,5 cm.)

Druck in mm Hg	J Stromstärke in Ampère	V Spannungsabfall zwischen den Sonden	$J \cdot V$ Wattverbrauch	Helligkeit in Kerzen
0,3	0,06	74	4,5	0,39
	0,17	75	12,8	0,95
	0,30	65	19,8	2,05
	0,60	64	38,0	3,7
	1,10	63	69,0	7,2
	1,88	58	110	12,3

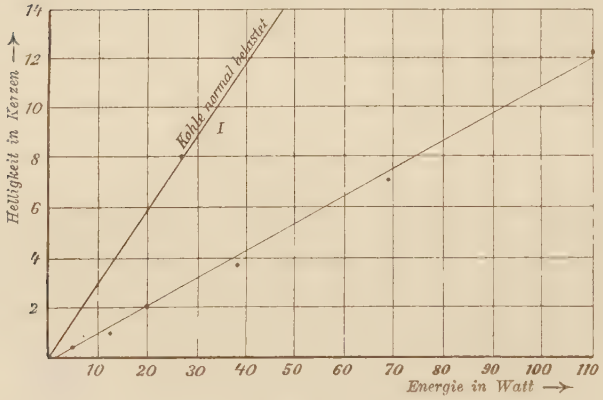

Fig. 4.

Die entsprechende Kurve (Fig. 4) gibt die Lichtintensität als Funktion des Energieverbrauches. Diese Kurve ist ebenfalls eine gerade Linie, da der Gradient annähernd konstant ist.[1]) Man erkennt übrigens, daß der optische Nutzeffekt im positiven Licht, d. i. das Verhältnis der Lichtstrahlung zur geleisteten Arbeit, ein geringer ist. Ein normal belasteter Kohlenfaden (vgl. Fig. 4) würde eine mehr als doppelt so große Helligkeit geben. Allerdings konnte der Nutzeffekt im positiven Lichte durch Beimengung ganz geringer Mengen anderer

1) Vgl. Abschnitt III dieser Arbeit.

Gase beträchtlich verändert werden. So hatten oftmals Kurven, die unter scheinbar denselben Verhältnissen aufgenommen waren, doch merklich verschiedene Richtungen. Daß der Einfluß kleiner Beimengung (Sauerstoff, Quecksilberdampf) ein recht beträchtlicher auf die Intensität des Spektrums ist, haben u. a. eingehend P. Lewis [1]) und E. Wätzmann [2]) gezeigt.

§ 4. Strahlung einzelner Spektralbezirke; Abhängigkeit von der Stromstärke.

Quantitative spektrophotometrische Messungen der Strahlung leuchtender Gase sind von Simonsen [3]), Ferry [4]), Kalähne [5]), Langenbach [6]), Berndt [7]) u. a. ausgeführt worden. Aus diesen Messungen ergab sich als wesentlichstes Resultat, daß für die meisten Gase (Quecksilberdampf und Kadmiumdampf ausgenommen) [8]) die Strahlung eines einzelnen Spektralbezirkes der Stromstärke proportional ist. Die Messungen gehen im Maximum bis etwa 10 Milliampère.

Geht man, wie in vorliegender Untersuchung ausgeführt wurde, bis zu Stromstärken von 1 Ampère, so ergibt sich auch innerhalb dieser Grenzen wenigstens für Rohrweiten zwischen 2 und 4 cm der Satz, daß

die Strahlung eines einzelnen Spektralbezirkes proportional der Stromstärke ist,

und als notwendige Folge auch der folgende:

Die spektrale Verteilung der Energie ist unabhängig von der Stromstärke. Dabei gelten diese Resultate, das mag hier nochmals besonders betont werden, für die vollkommen stetige

---

1) P. Lewis, Wied. Ann. **69.** p. 398. 1899.
2) E. Wätzmann, Diss. Breslau 1904; Ann. d. Phys. **14.** 1904.
3) Simonsen, Diss. Kiel 1892.
4) F. C. Ferry, Phys. Rev. **7.** p. 1 und 296. 1898.
5) A. Kalähne, Diss. Berlin 1898; Wied. Ann. **65.** p. 815. 1898.
6) K. Langenbach, Diss. Bonn 1902; Ann. d. Phys. **10.** p. 789. 1903.
7) G. Berndt, Ann. d. Phys. **12.** p. 1101. 1903.
8) A. Kalähne, l. c. p. 834 ff.

Entladungsform. Die meisten der bisher gewonnenen Resultate werden nämlich gerade dadurch beeinträchtigt, daß die Untersuchungen mit Hilfsmitteln vorgenommen werden mußten, die immer eine disruptive Entladungsform bedingten. Bei der disruptiven Entladungsform aber haben, wie schon mehrfach gezeigt wurde, Kapazität und Selbstinduktion des Stromkreises einen wesentlichen Einfluß auf das Spektrum. Übersichtliche Resultate wird man daher nur dann erhalten, wenn man die einfachste Entladungsform hat, d. h. also, wenn der durch das Rohr fließende Strom kontinuierlich ist.

Die diesbezüglichen Messungen wurden mittels eines Glanschen Photometers ausgeführt. Eine kleine Osmiumlampe diente als Vergleichslichtquelle. Durch den Okularschieber des Photometers war das ganze Spektrum bis auf die Bande des Stickstoffs $\lambda = 6069$ Å.E. abgeblendet. Die eine Messungsreihe der Tabelle 4 wird durch Kurve *I* der Figur 5 dargestellt. Die zweite Messungsreihe fällt mit der ersten fast völlig zusammen und ist daher nicht mehr eigens eingetragen. Die Kurven *II* und *III* sind Messungen in elektrolytisch dargestelltem Wasserstoff für die Linie H_α $\lambda = 6563$ Å.E. Die Zahlenwerte hierfür sind in Tabelle 5 zu finden. Wie man sieht, sind bei Wasserstoff die Verhältnisse ganz ähnlich wie im Stickstoffe, es wächst auch hier die Strahlung proportional mit der Stromstärke.[1])

Tabelle 4.

Stickstoff, Rohr Fig 1. (Rohrweite 2,5 cm.)

Druck	Gradient	Helligkeit	Stromstärke	Druck	Gradient	Helligkeit	Stromstärke
0,23 mm	5 Volt/cm	2,3	0,11	0,18 mm	4 Volt/cm	2,5	0,18
		4,1	0,20			7,6	0,34
		6,9	0,29			12,0	0,54
		10,6	0,48			17,4	0,74
		13,2	0,62			25,7	1,08

1) Über diese spektralphotometrischen Messungen ist bereits in den Verhandlungen des ersten internationalen Kongresses zum Studium der Radiologie und Ionisation Lüttich 1905 berichtet.

Tabelle 5.

Wasserstoff, Rohr Fig. 1. (Rohrweite 3,5 cm.)

Druck	Gradient	Helligkeit	Stromstärke	Druck	Gradient	Helligkeit	Stromstärke
0,34 mm	3,5 Volt/cm	0,94	0,19	0,21 mm	2,9 Volt/cm	0,45	0,20
		3,85	0,50			1,20	0,35
		5,50	0,69			2,56	0,52
		6,10	0,80			3,85	0,74
		8,40	1,12			5,60	1,14

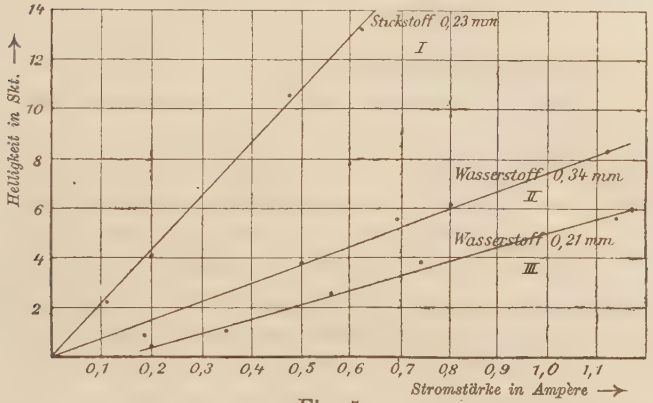

Fig. 5.

Ein Punkt wäre hier noch besonders zu erörtern, d. i. der bereits S. 8 erwähnte Farbenübergang des positiven Stickstofflichtes von rot zu gelb. Dieser Farbenwechsel läßt sich, wenn das Gas einigermaßen rein ist, immer deutlich erkennen; er findet in engen Röhren eher statt als in weiten, doch ist bei Stromstärken von etwa 0,1 Ampère das Licht immer schon völlig gelb. Durch eine Reihe photographischer Spektralaufnahmen mittels Gelbscheibe und farbenempfindlichen Platten konnte festgestellt werden, daß die im Gelben liegenden Banden des Stickstoffs rascher an Intensität zunehmen als es das Proportionalitätsgesetz zwischen Helligkeit und Stromstärke erforderte. Danach würde also für Stickstoff mit großer Annäherung folgendes gelten: Die Intensität aller Stickstoffbanden wächst proportional mit der Stromstärke, mit Ausnahme der Banden im Gelb. Die Intensität dieser Banden

wächst zuerst rascher als die Stromstärke; hat man aber eine Stromintensität von 0,1 Ampère erreicht, so gilt auch für diese Banden das Proportionalitätsgesetz.

Es muß noch besonders hervorgehoben werden, daß die in diesem und dem vorhergehenden Paragraphen abgeleiteten Sätze nur Gültigkeit haben für große Rohrquerschnitte und tiefe Drucke. Es ist wohl möglich, daß in engen Röhren und bei höheren Drucken die Strahlung langsamer als die Stromstärke wächst.[1]) Gerade unter diesen Bedingungen sind aber infolge des hohen Gradienten auf der positiven Säule Messungen nicht möglich.

§ 5. Die Abhängigkeit der Strahlung vom Druck.

Die Abhängigkeit der Strahlung vom Druck wurde in einem Intervall von 0,03—0,6 mm untersucht. Bei höheren Drucken ist infolge des großen Gradienten auf der positiven Säule die Potentialdifferenz von 440 Volt zu gering, um einen Strom durch das Rohr schicken zu können. Eine Messungsreihe ist in Tabelle 6 wiedergegeben. Die Strahlung der Rohrwände, ebenso die der Kathode ist in Abrechnung gebracht. Die Stromstärke wurde konstant auf 0,1 Ampère erhalten. Es war zu diesem Zweck ein Präzisionsmilliampèremeter von Keiser & Schmidt, Berlin, und ein Schieberrheostat von 200 Ohm in den Hauptstromkreis eingeschaltet. Der Strom ließ sich leicht bis auf $\pm$ 1 Milliampère konstant erhalten.

Tabelle 6.

Stickstoff, Rohr Fig. 2. (Rohrweite 3,2 cm.)

Druck mm	Gradient Volt	Strahlung S	Lichtstrahlung S_L	S_L / S
0,62	13	24	12	0,50
0,51	12	16	8	0,50
0,44	11	16	8	0,50
0,33	9,4	15	8	0,53
0,20	8,1	15	8	0,53
0,14	6,3	14	8	0,57
0,08	3,9	12	6	0,50
0,03	2,1	11	6	0,54

1) Vgl. J. Stark, Ann. d. Phys. **14.** p. 506. 1904.

Eine Verschiebung des Intensitätsmaximums mit abnehmendem Druck läßt sich aus Tabelle 6 nicht ersehen.[1]) Der Quotient S_L/S, also das Verhältnis der Lichtstrahlung zur Gesamtstrahlung, ist für Drucke von 0,62—0,03 mm innerhalb der Fehlergrenze konstant. Der Wert des Verhältnisses S_L/S selbst ist aber im Vergleich mit den Messungen Ångströms bedeutend kleiner. Nach Ångström beträgt der Wert dieses Verhältnisses bis 0,92. Der große Unterschied ist verständlich, weil bei den vorliegenden Messungen als absorbierendes Mittel die $FeSO_4$-Lösung in Verwendung kam, während Ångström den weniger absorbierenden Alaun benützt. Der wahre Wert des optischen Nutzeffektes ist natürlich noch bedeutend geringer, denn auch die $FeSO_4$-Lösung läßt außer den Lichtstrahlen auch noch Strahlen anderer Wellenlängen durch. Der optische Nutzeffekt einer Amylacetatlampe bestimmte sich auf diese Weise zu 0,03, während der wahre Wert nach den neuen Messungen von Ångström[2]) 0,01 beträgt. Daraus läßt sich folgern, daß der optische Nutzeffekt des positiven Lichtes für Stickstoff ca. 18 mal so groß ist als für eine Amylacetatlampe.

Mit abnehmender Rohrweite findet allerdings eine schon dem bloßen Auge bemerkbare Verschiebung des spektralen Intensitätsmaximums nach der Seite der kürzeren Wellenlänge hin statt.[3])

Aus der Tabelle 6 folgt auch:

Für Stickstoff nimmt unter den oben beschriebenen Versuchsbedingungen die Strahlung mit abnehmendem Druck ab.

Ångströms Tabellen[4]) zeigen ähnliche Verhältnisse.

Um die Messungen in bezug auf den Gasdruck in etwas höherem Maße variieren zu können, trat für ein paar Versuchsreihen an Stelle der Starkstromleitung die Hochspannungsbatterie. In einem ca. 2 cm weiten Rohr war die Stromstärke auf den konstanten Wert von 1,55 Milliampère eingestellt, während der Druck in den Grenzen von 3 mm bis zu 0,08 mm verändert wurde. Gleichzeitig wurden spektrophotometrische

1) Nach Ångström verschiebt sich mit abnehmendem Druck das Intensitätsmaximum nach dem violetten Teile des Spektrums.

2) Landolt-Börnstein, Tabellen.

3) E. Goldstein, Wied. Ann. **11.** p. 832. 1880.

4) K. Ångström, l. c. p. 511.

Messungen in einer blauen bez. roten Bande des Stickstoffs ausgeführt. Die Kurven der Fig. 6 geben die Resultate wieder. Als Ordinaten sind die Helligkeiten angetragen, als Abszissen die Potentialgradienten, die sich in demselben Sinne ändern wie die Gasdrucke.

Man sieht, die Strahlung wächst zunächst mit zunehmendem Gasdruck bis zu einem Maximalwert, der für diese beiden Banden bei 0,46 mm [Gradient 6 Volt] lag. Von hier an nimmt die Strahlung wieder ab. Bei den Drucken, bei denen die

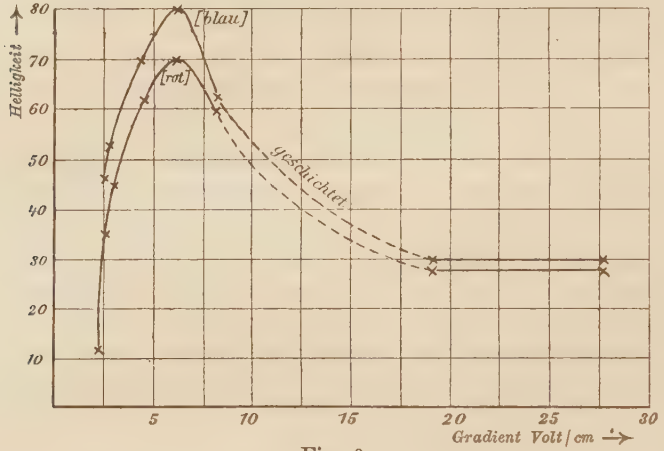

Fig. 6.

Entladung geschichtet war, waren die photometrischen Bestimmungen unsicher. Die gefundenen Kurven gleichen sehr den von Langenbach[1]) für die Wasserstofflinien gefundenen.

II. Temperaturmessungen.

§ 6. Literaturübersicht.

Wohl zuerst wurde von E. Wiedemann[2]) darauf hingewiesen, daß die Temperatur in einem Rohre, in dem eine

1) K. Langenbach, l. c.

2) E. Wiedemann, Wied. Ann. **6.** p. 298. 1879; vgl. auch Wied. Ann. **10.** p. 202. 1880; **20.** p. 756. 1883.

leuchtende Entladung stattfindet, eine ganz geringe sein kann. E. Wiedemann berechnet auf Grund kalorimetrischer Messungen, daß die Temperatur in weiteren Röhren beim Stromdurchgang weit unter 100° liegen kann, daß aber in Kapillaren bei diskontinuierlichen Entladungen die Temperatur viele tausend Grad wohl erreichen könne. Messungen und Berechnungen ähnlicher Art wurden ferner von Hittorf[1]), Paalzow und Neesen[2]) sowie von Stark[3]) ausgeführt.

Unter der Annahme, daß die gesamte elektrische Energie an der Stelle des Rohres, wo sie verbraucht wird, sich in Wärme umsetzt, hat Warburg[4]) für die positive, ungeschichtete Säule die Temperaturen in der Rohrachse, an der inneren Rohrwand und die mittlere Temperatur des Gases berechnet.

R. W. Wood[5]) hat diese Theorie in vielen Punkten auf experimentellem Wege bestätigt. Er führt einen Bolometerdraht, verschiebbar durch einen Quecksilberbarometerverschluß in das Innere eines Entladungsrohres ein und mißt so unter verschiedenen Bedingungen die Temperatur in den einzelnen Teilen der Entladung. Die wichtigsten für das Folgende in Betracht kommenden Resultate seiner Arbeit sind:

1. Der Quotient Temperaturerhöhung durch Stromstärke ist bei konstantem Druck nahezu konstant.

2. Bei der geschichteten Entladung ist die Temperatur größer in den leuchtenden als in den dunklen Teilen. Größere Temperaturunterschiede zwischen den hellen und dunklen Stellen als 1,5° wurden nicht nachgewiesen. In keinem Falle wurde eine Temperatur gemessen, die 73° überstieg.

Die Messungen von Wood sind neuerdings wieder von K. Kerkhof[6]) aufgenommen und in vieler Hinsicht bestätigt worden; doch sind diese Messungen bei Verwendung eines Funkeninduktors ausgeführt, die Entladung ist damit diskontinuierlich und der Wert der Resultate nicht sicher (vgl. S. 16).

1) W. Hittorf, Wied. Ann. **21.** p. 128. 1884.
2) A. Paalzow und F. Neesen, Wied. Ann. **56.** p. 276. 1895.
3) J. Stark, Ann. d. Phys. **2.** p. 424. 1900.
4) E. Warburg, Wied. Ann. **54.** p. 265. 1895.
5) R. W. Wood, Wied. Ann. **59.** p. 238. 1896.
6) K. Kerkhof, Diss. Bonn 1900; Ann. d. Phys. **4.** p. 327. 1901.

Die folgenden von mir ausgeführten Temperaturmessungen waren veranlaßt durch eine Beobachtung, die ich anläßlich der Strahlungsmessungen machte. Es zeigte sich nämlich, daß dünne Platindrähte, wie sie zu den Sonden verwendet waren, sich im positiven Licht bei gesteigerter Stromstärke bis zur Glühtemperatur erhitzten. Es werden im folgenden Messungen mitgeteilt werden, die die Abhängigkeit der Temperatur von Stromstärke und Gasdruck zeigen, und Messungen, die sich auf die Temperaturverhältnisse in den Schichten bei großer Stromstärke beziehen.

§ 7. Das Bolometer.

Die Versuche waren zunächst so angeordnet, daß in einem Rohre, wie es Fig. 1 zeigt, durch einen Rohransatz zwischen den beiden Sonden ein feiner, zur Schlinge gebogener Platindraht als Bolometer in das Innere des Rohres eingeführt war. Die Länge des Bolometerdrahtes betrug 5,4 cm, seine Dicke 0,025 mm. Hieraus berechnet sich ein Widerstand von 15,4 Ohm bei 18°. Dieser feine Bolometerdraht war zunächst an dickere, je 20 cm lange Platindrähte angelötet, die ihrerseits wieder mit Kupferdrähten verbunden waren. Der Widerstand der Zuleitungsdrähte betrug 1,34 Ohm. Das Bolometer bildete den einen Zweig einer Wheatstoneschen Brücke. In der Brücke lag ein Wiedemannsches Galvanometer, dessen Ausschläge durch Projektion sichtbar gemacht waren. Alle zum Bolometer gehörigen Meßinstrumente waren isoliert aufgestellt, damit kein Zweigstrom durch das Bolometer zur Erde fließen konnte.

Die Berechnungen der Temperaturen aus den zugehörigen Platinwiderständen geschah nach der von Callendar[1]) gegebenen Methode. Ist W_0 der Widerstand des Bolometers bei 0°, W_{100} der Widerstand bei 100°, so ist für einen beliebigen Widerstand W des Bolometers die zugehörige, sogenannte „Platintemperatur pt“ gegeben durch die Gleichung:

$$pt^0 = (W - W_0)/(W_{100} - W_0) . 100^0.$$

1) H. L. Callendar, Phil. Trans. **178.** p. 161. 1887 und **182.** p. 119. 1891; Phil. Mag. **14.** p. 1. 1899; **48.** p. 519. 1899.

Die nach dieser Gleichung berechnete Platintemperatur weicht namentlich bei höherer Temperatur von der wahren Temperatur t beträchtlich ab. Diese Differenz wird gegeben durch die Gleichung:

$$t - tp = \delta\left[\left(\frac{t}{100}\right)^2 - \frac{t}{100}\right].$$

Den Wert der Konstanten δ bestimmt man durch Beobachtung der Platintemperatur pt im Schwefeldampf ($t = 445^0$).

Für das vorliegend verwendete Bolometer war:

$$W_0 = 14{,}60 \text{ Ohm},$$
$$W_{100} = 18{,}66 \text{ Ohm},$$
$$W_{445} = 31{,}96 \text{ Ohm}.$$

Daraus berechnet sich der Wert der Konstanten δ zu 1,3.

Sämtliche Temperaturen der folgenden Tabellen sind auf die vorstehend beschriebene Weise berechnet und auf 5 Grad abgerundet.

Eine wesentliche Frage ist naturgemäß die, inwieweit überhaupt der Bolometerdraht die Temperatur des erhitzten Gases annimmt. Infolge des Wärmeverlustes durch Strahlung und durch Leitung wird die mit dem Bolometerdraht gemessene Temperatur kleiner sein als die wahre mittlere Temperatur des Gases. Um einen Anhalt zu haben, inwieweit diese Größen von Einfluß sind, machte W. Wood[1]) Messungen einerseits mit einem Platindraht von 0,035 mm Durchmesser, andererseits mit einem Platinblechstreifen von den Dimensionen $0{,}1 \times 1{,}5 \times 0{,}0001$ cm³. Die mit beiden Bolometern vorgenommenen Messungen zeigten, daß wenigstens für nicht zu hohe Temperaturen das Bolometer die Temperatur des Gases genau genug annahm.

Nun werden allerdings die durch Leitung und namentlich die durch Strahlung bedingten Wärmeverluste gerade bei den hohen Temperaturen, wie sie in den vorliegenden Fällen fast ausschließlich zu messen waren, naturgemäß bedeutend größer. Doch zeigte der im folgenden beschriebene Versuch, daß diese Verluste die Temperatur des Bolometerdrahtes doch nicht er-

1) R. W. Wood, l. c. p. 242.

heblich herunterzusetzen vermochten. In einem Rohre, das mit einer Oxydkathode versehen war, waren senkrecht zur Rohrachse etwa in der Mitte des positiven Lichtes zwei Platindrähte von 0,025 und 0,25 mm Durchmesser angeordnet. Bei dem dickeren Draht waren also, da der Querschnitt hundertmal größer ist, als der des dünneren, auch die Wärmeverluste durch Ableitung hundertmal so groß, ebenso war der Verlust durch Strahlung bei dem dickeren Drahte der zehnfache der zehnfachen Drahtoberfläche entsprechend. Durch das Rohr wurde nun langsam anwachsend ein immer stärkerer Strom geschickt. Es zeigte sich, daß beide Drähte bei derselben Stromstärke zu glühen begannen und stets dieselbe Helligkeit zeigten. Nur an den Enden der Drähte machte sich die verschieden große Wärmeableitung bemerkbar.

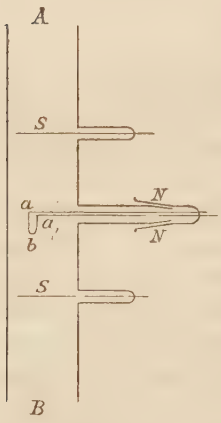

Fig. 7.

Erst nach Fertigstellung dieser Arbeit erschien eine Untersuchung von J. E. Lilienfeld[1]), in der der Verfasser auf Grund seiner Versuche zu dem Ergebnis kommt, daß ein Thermoelement oder ein noch so feiner Bolometerdraht auch nicht annähernd die Temperatur der Entladung annimmt. Ist dem wirklich so, so können die im folgenden mitgeteilten Kurven nur als solche gelten, die ein Abbild der wirklichen Verhältnisse geben.

Veranlaßt durch eine Bemerkung von Hrn. Prof. Dr. Grätz in München sowie von Herrn Dr. Schönrock in Berlin möge an dieser Stelle noch erörtert werden, ob nicht sekundäre Umstände die hohe Temperatur des Drahtes wesentlich bedingen. In einem Entladungsrohr AB (Fig. 7) sei senkrecht zur Rohrachse ein Draht (z. B. Sonde S) ausgespannt. Dieser Draht wird sich erhitzen, wenn das ihn umgebende Gas selbst durch den Strom erhitzt wird. Außerdem findet auch noch eine Erwärmung des Drahtes dann statt, wenn der Strom oder ein Teil desselben in den Draht eintritt und infolgedessen Joulesche Wärme frei wird oder der Draht sich infolge eines

1) J. E. Lilienfeld, Verh. d. Deutsch. phys. Ges. 4. p. 182. 1906.

Kathodenfalles bez. Anodenfalles beim Ein- oder Austritt des Stromes erwärmt.

Nehmen wir den extremsten Fall, daß der ganze Strom an der Stelle, wo der Draht sich befindet, so zusammengeschnürt würde, daß er ausschließlich durch den Draht hindurchgeht.[1]) Die Stromstärke im Rohr sei 1 Ampère, der Gradient 4 Volt. Ist die Drahtdicke $^1/_{40}$ cm, so hätte man längs dieses vierzigstel Zentimeter einen Potentialabfall von 0,1 Volt. Geht der ganze Strom von 1 Ampère durch diesen Draht[2]), so würden im ganzen Draht, der eine Länge von 3 cm besitzen mag, 0,1 Watt sich in Wärme umsetzen können. Beachtet man dagegen, daß man eine ganz bedeutend größere Wattzahl nötig hätte, um einen solchen Draht etwa mittels Akkumulatoren zur Weißglut zu erhitzen, so erkennt man leicht, daß nicht eine derartige Sekundärerscheinung der Grund für die Erwärmung solcher Drähte ist.

Ganz anders liegen natürlich die Verhältnisse bei diskontinuierlichen Entladungen. In diesem Falle würde der Draht und etwa mit ihm verbundene Kapazitäten sich in raschem Wechsel laden und entladen, wodurch sich unter Umständen der Draht wohl auf Glühtemperatur erhitzen könnte.

Es möge noch der folgende Einwand, der bezüglich der Temperaturmessungen gemacht werden könnte, besprochen werden. In Fig. 7 sei durch $a\,b\,a_1$ die Schlinge des Bolometerdrahtes dargestellt. Offenbar herrscht dann zwischen den Punkten a und b, ebenso zwischen a_1 und b eine Potentialdifferenz, wenn ein Strom durch das Entladungsrohr fließt. Es fragt sich, ob nicht infolge dieser Potentialdifferenz bei b ein Strom in den Draht eintritt, um bei den Punkten a und a_1 wieder auszutreten. Ein derartiger Strom würde naturgemäß den Bolometerdraht erwärmen und die Temperatur des Gases würde bei den Messungen höher erscheinen, als sie wirklich ist.

Man zeigt aber leicht, daß, wenn ein solcher Strom überhaupt vorhanden ist, derselbe nur von verschwindender Stärke sein kann. Dreht man nämlich, was durch den Schliff NN

1) In Wirklichkeit wird die Entladungsform durch einen eingeführten Draht nicht beeinflußt.

2) Die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes kann man nicht annehmen, da sich ein Kathodenfall und Anodenfall ausbildet.

leicht bewerkstelligt werden kann, den Bolometerdraht derartig, daß die Schlinge senkrecht zur Rohrachse liegt, so kann nun zwischen den Punkten a und b keine Potentialdifferenz mehr vorhanden sein. Da man in dieser Lage angenähert dieselben Temperaturen mißt, als in der ersten, so ist wohl ein Zweigstrom $a-b$ nicht vorhanden bez. von ganz geringer Stärke.

Daß die gemessenen hohen Temperaturen wirklich im Gase vorhanden sind und sich nicht durch eine fehlerhafte Meßmethode ergeben, erkennt man auch daran, daß vollkommen isolierte, senkrecht zur Rohrachse ausgespannte Nichtleiter, wie etwa die Fäden eines Auerstrumpfes ebenfalls zum Glühen kamen.

§ 8. Abhängigkeit der Temperatur von Stromstärke und Gasdruck.

In den folgenden Tabellen 7a—7d und 8a—8c bedeutet J die Stromstärke in Ampère, V den Gradienten in Volt/cm, $J.V$ das Produkt dieser beiden Größen oder die pro Längeneinheit im Rohre verbrauchte Energie. W ist der Widerstand des Bolometers in Ohm, T die daraus nach § 7 berechnete Temperatur. In der letzten Spalte ist der Quotient $T/J.V$ eingetragen. Die Rohrweite betrug für die Tabellen 7 3,1 cm, für die Tabellen 8 4,4 cm. Die Figg. 7 und 8 geben die entsprechenden Kurven.

Tabelle 7a.

Druck = 0,48 mm.

J	V	JV	W	T	T/JV
0,09	8,7	0,78	24,4	250	320
0,17	8,4	1,43	28,7	360	250
0,23	7,9	1,83	32,5	460	250
0,48	7,5	3,60	36,3	565	150
0,50	7,3	3,65	37,8	610	170
0,63	7,0	4,40	40,1	710	160
0,86	6,7	5,75	44,1	805	140
0,99	6,5	6,45	46,3	860	130
1,21[1])	6,5	7,85	50,5	995	130
1,80[1])	6,1	10,93	57,1	1225	110

1) Hellrot glühende Sonden.

Tabelle 7b.

Druck = 0,26 mm.

J	V	JV	W	T	T/JV
0,08	5,8	0,46	18,3	90	200
0,26	5,2	1,35	28,9	365	270
0,36	5,1	1,83	31,9	445	240
0,49	5,1	2,50	34,1	505	200
0,75	5,0	3,75	40,4	685	180
1,02	4,9	4,90	42,7	760	150
1,18	4,9	5,79	45,1	825	140
1,46	4,7	6,86	48,1	915	130

Tabelle 7c.

Druck = 0,11 mm.

J	V	JV	W	T	T/JV
0,10	3,2	0,32	17,3	65	200
0,16	3,0	0,48	20,3	140	290
0,32	2,9	0,93	23,5	225	240
0,42	2,6	1,09	25,7	275	250
0,61	2,4	1,46	28,5	355	240
0,76	2,3	1,75	30,5	405	230
0,94	2,2	2,07	31,7	435	210
1,23	2,2	2,71	33,3	480	180
1,38	2,2	3,04	34,9	535	180
1,61	2,1	3,38	37,5	600	180
1,88	2,1	3,95	38,7	645	160
2,4	1,9	4,56	42,0	740	160

Tabelle 7d.

Druck = 0,05 mm.

J	V	JV	W	T	T/JV
0,10	1,9	0,19	17,1	60	310
0,17	1,7	0,29	18,3	90	310
0,33	1,6	0,53	21,3	170	320
0,46	1,5	0,69	22,1	190	280
0,63	1,5	0,95	24,1	240	250
0,77	1,5	1,15	26,3	295	260
1,00	1,5	1,50	28,1	340	230
1,23	1,4	1,72	29,5	380	220
1,63	1,4	2,28	30,7	415	180
1,96	1,4	2,74	31,7	435	160
2,47	1,4	3,46	33,5	495	140

Tabelle 8a.

Druck = 0,55 mm.

J	V	JV	W	T	T/JV
0,04	9,0	0,32	24,3	250	780
0,11	8,4	0,92	35,7	545	590
0,28	8,0	2,24	46,5	870	390
0,39 [1])	7,8	3,04	53,4	1100	360
0,51 [1])	7,4	3,77	58,2	1250	330
0,80 [1])	7,0	5,60	69,5	1550	290

Tabelle 8b.

Druck = 0,16 mm.

J	V	JV	W	T	T/JV
0,09	5,0	0,45	22,3	195	430
0,14	4,7	0,67	27,1	320	480
0,29	4,4	1,27	32,3	455	360
0,39	4,0	1,56	35,9	560	360
0,50	4,0	2,00	40,7	700	350
0,58	4,0	2,32	48,1	910	390
0,67	4,0	2,68	54,2	1125	420

Tabelle 8c.

Druck = 0,05 mm.

J	V	JV	W	T	T/JV
0,10	1,7	0,17	21,9	190	1120
0,18	1,7	0,31	24,3	250	800
0,22	1,7	0,37	25,7	270	730
0,31	1,7	0,51	27,1	320	640
0,41	1,7	0,70	29,9	390	550
0,66	1,7	1,14	32,3	445	400
1,00	1,7	1,70	36,3	570	340

Aus den Tabellen und Kurven folgt: Die mit dem Bolometer gemessene Temperatur wächst langsamer als die Stromstärke (vgl. die Figg. 8 und 9). Dies ist wohl schon insofern verständlich, weil die Wärmeverluste nicht proportional mit der Temperatur, sondern weit rascher wachsen; der Bolo-

1) Hell glühende Sonden.

meterdraht bleibt desto mehr hinter der wahren Temperatur des Gases zurück, je größer diese ist.

In den letzten Spalten der Tabellen ist jedesmal die Größe $T/J.V$ eingetragen, d. i. das Verhältnis der Temperatur zu der pro Zentimeter des Rohres verbrauchten Energie. Dieses Verhältnis ist unabhängig vom Gasdruck, oder, was dasselbe ist, von der Größe der Faktoren des Produktes $J.V$. Am besten tritt das eben Gesagte hervor, wenn man graphisch die

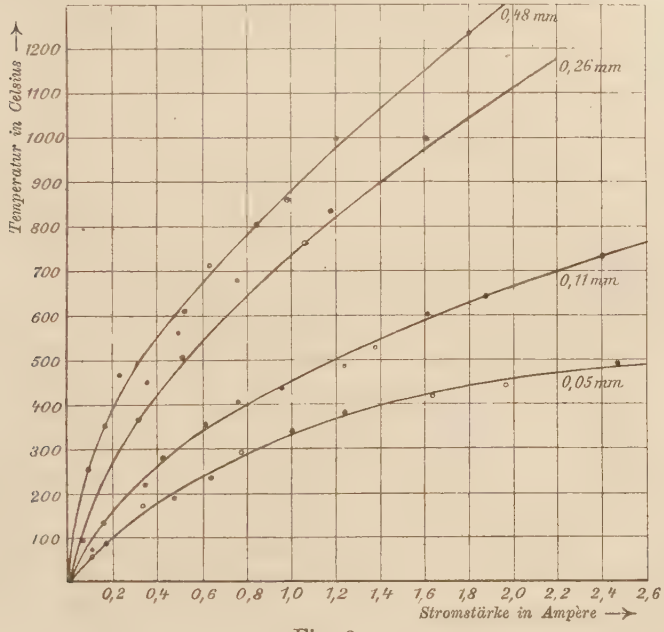

Fig. 8.

Abhängigkeit der Temperatur vom Wattverbrauch darstellt. Während in den Figg. 8 und 9 die Temperatur als Funktion der Stromstärke aufgezeichnet ist, ist hier in Fig. 10 die Temperatur als Funktion des Wattverbrauches angetragen. Dabei fallen die für ein Rohr bei verschiedenen Drucken gemessenen Werte in je eine Kurve zusammen.

Daß für das 4,4 cm weite Rohr die Temperaturen so beträchtlich höher sind, wird wohl durch eine andere Zusammensetzung des Gasinhaltes bedingt gewesen sein. Wenigstens

konnte ich mich mehrmals davon überzeugen, daß der Gasinhalt von wesentlichem Einfluß auf die Temperatur ist.

Aus den vorstehenden Messungen ergibt sich auch, daß ein stark erhitztes Gas wohl noch leuchten kann. Auch bei den Stromstärken, bei denen das Bolometer Temperaturen von 1000° und darüber anzeigte, gingen noch helleuchtende Entladungen durch das Rohr. Hittorf[1]) war in diesem Punkte zu einer anderen Ansicht gelangt.

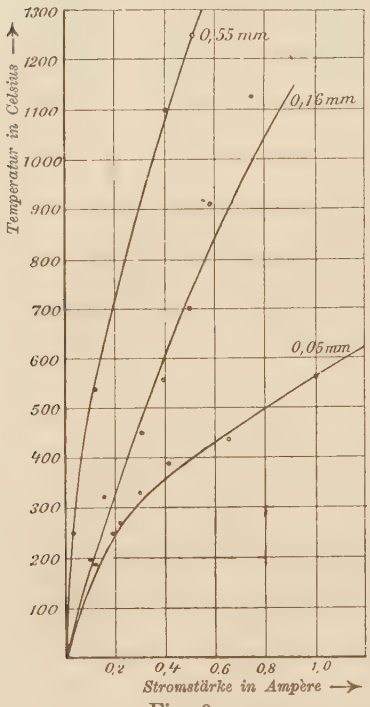

Fig. 9.

Im allgemeinen ist noch folgendes zu bemerken: Die Glaswände erhitzen sich beim Stromdurchgang in hohem Grade; es trat auch mehrmals der Fall ein, daß das Glas in der Nähe der Kathode weich und eingedrückt wurde. Leichter schmelzbare Metalle kommen, in das positive Licht gebracht, zum Verdampfen; Platindrähte kommen, wie bereits erwähnt, zum Glühen, ja sogar zum Schmelzen. So gelang es bei einer Stromstärke von 2,5 Ampère in einem engeren Rohr einen ziemlich kräftigen Platindraht — 0,25 mm stark — zum Schmelzen zu bringen. Das entspricht einer Temperatur von fast 1800°.

§ 9. Die Temperaturverteilung in Richtung der Rohrachse.

Da in den weiten Röhren bei großen Stromdichten die Schichten sich besonders schön ausbildeten, lag es nahe, in ähnlicher Weise, wie es Wood getan hatte, auch hier die Temperaturverteilung in den Schichten zu messen.

1) W. Hittorf, Wied. Ann. **21.** p 106. 1884; vgl. zu dieser Frage auch: G. C. Schmidt, Ann. d. Phys. **1.** p. 629 Anm. 2. 1900.

Es wurde ein Rohr verwendet, wie es Fig. 11 zeigt. K ist die Oxydkathode, A die Eisenanode; durch ein Barometerverschlußrohr B von 90 cm Länge ist ein Thermoelement T in einem engeren Glasrohr isoliert eingeführt. Das Thermoelement bestand aus Platin und Platin(10 %)rhodiumdrähten von 0,025 mm Dicke. Die Drähte waren so gebogen,

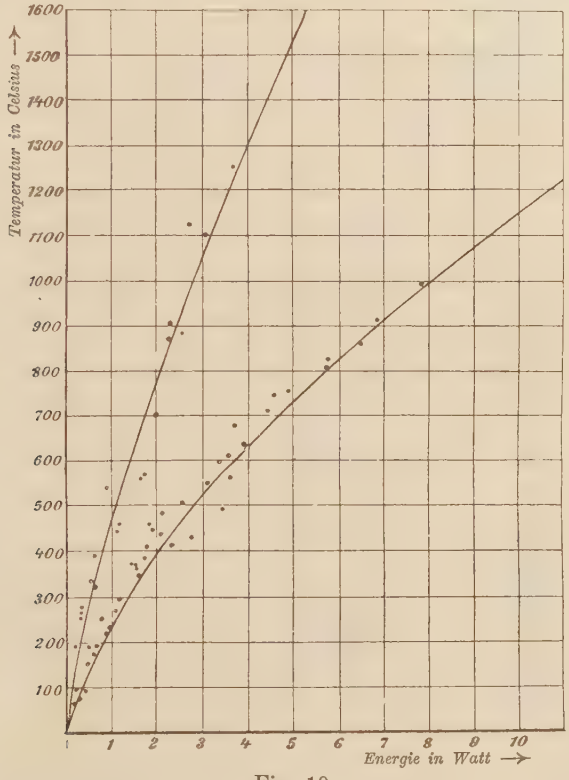

Fig. 10.

daß die Lötstelle möglichst in der Rohrachse des Entladungsrohres lag. Die Verwendung eines Thermoelementes an Stelle des Bolometers geschah namentlich aus dem Grunde, weil das Thermoelement in weit höherem Maße gestattet, die Temperatur einer bestimmten Stelle im Rohre zu messen, als das Bolometer, das, um brauchbar zu sein, immerhin eine beträchtliche Drahtlänge besitzen muß und infolgedessen einen

Temperaturmittelwert für einen gewissen Bezirk gibt. Um Fehler durch Widerstandsänderungen der Drähte des Thermoelementes zu vermeiden, wurde eine Kompensationsmethode in Anwendung gebracht (nach Du Bois-Reymond).

Die Messungen bestätigten das von Wood[1]) gefundene Resultat, daß die Temperatur in den leuchtenden Teilen

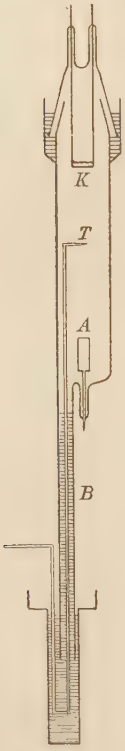

Fig. 11.

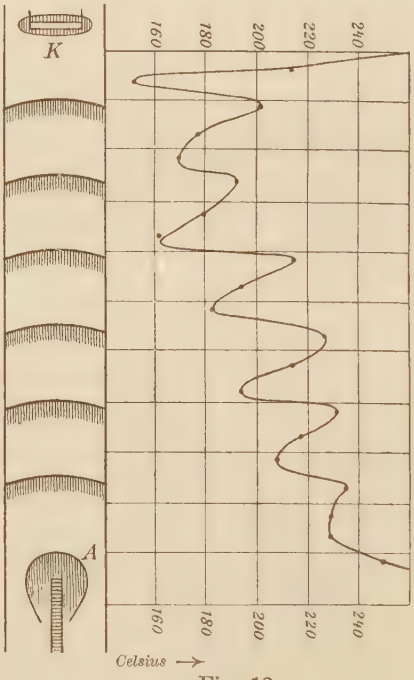

Fig. 12.

eine größere ist als in den dunklen Zwischräumen. Diese Temperaturunterschiede waren in den weiten Röhren bei den relativ hohen Stromstärken recht beträchtliche. Es wurden Temperaturunterschiede bis gegen 50° gemessen. Wood fand unter seinen Versuchsbedingungen im Maximum 1,5°. Am besten ersieht man die Verhältnisse aus Fig. 12.

Links ist die Form der Entladung abgebildet, wie sie

1) R. W. Wood, l. c. p. 246 ff.

sich bei einer Stromstärke von 0,08 Ampère und einem Druck von 0,09 mm ausbildete.

Rechts ist die Temperaturkurve eingezeichnet. Die Messungen in der ersten und letzten Schicht sind durch die Strahlung des Oxydbleches bez. der Anode beeinflußt; diese beiden Schichten zeigen aus diesem Grunde einen von den anderen abweichenden Temperaturverlauf. Man ersieht auch

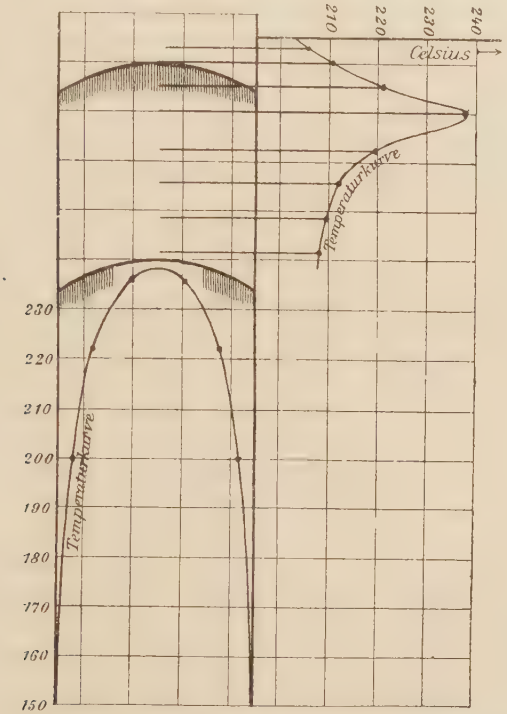

Fig. 13.

aus der Fig. 12, daß die Temperatur gegen die Anode hin wächst. Wood fand in den meisten Fällen ein Maximum der Temperatur in der Mitte des positiven Lichtes. Bei den vorliegenden Versuchsbedingungen zeigte sich ein derartiges Maximum niemals. In Fig. 13 oben ist noch der Temperaturverlauf in einer einzelnen Schicht gezeichnet. Die Versuchsbedingungen sind dieselben wie für Fig. 12. Auch hier zeigt die Kurve denselben Charakter als die entsprechende bei

Wood. Das Temperaturmaximum fällt mit dem Helligkeitsmaximum zusammen. Beide sind gegen den Schichtenanfang etwas verschoben.[1])

§ 10. Die Temperaturverteilung senkrecht zur Rohrachse.

Bei dem in Fig. 11 dargestellten Entladungsrohr konnte das Glasrohr, das die Drähte des Thermoelements führte, um seine eigene Achse gedreht werden. Bei einer solchen Drehung verschob sich die Lötstelle des Thermoelementes in einer zur Rohrachse senkrechten Ebene. Man konnte somit auch Temperaturmessungen senkrecht zur Rohrachse ausführen. Derartige Messungen liegen noch nicht vor. Eine Kurve, welche den Temperaturabfall in dieser Richtung zeigt, ist in Fig. 13 unten eingezeichnet. Während in der Rohrachse eine Temperatur von 238° herrschte, zeigte das Thermoelement, gegen die innere Glaswand gedreht, nur eine Temperatur von 149°. Es ist also ein ziemlich schroffer Temperaturabfall von der Rohrachse gegen die Glaswand vorhanden.

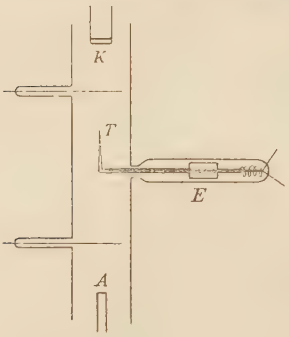

Fig. 14.

Wie bereits Seite 21 erwähnt, hat Hr. Warburg, ausgehend von den einfachsten und zunächstliegenden Voraussetzungen, zum ersten Male die Probleme an der Hand der Theorie der Wärmeleitung mathematisch diskutiert. Bei der Ableitung der Gleichungen mußte zunächst angenommen werden, daß die elektrische Energie an der Stelle, wo sie verbraucht wird, sich völlig in Wärme umsetzt, ferner, daß die Stromdichte im ganzen Rohrquerschnitt konstant ist. Man erhält Formeln, die die Temperatur an der inneren Rohrwand und in der Rohrachse, sowie die mittlere Temperatur des Gases zu berechnen gestatten.

Ich habe versucht, mittels eines Rohres, wie es in Fig. 14

1) Vgl. auch den Bericht des Verfassers über einen „Demonstationsversuch zur Erläuterung der Temperaturverhältnisse in den Schichten des positiven Lichtes". Verh. d. Deutsch. phys. Ges. 8. p. 116. 1906.

abgebildet ist, einige nach Möglichkeit genaue Temperaturbestimmungen durchzuführen, um damit die entsprechenden Berechnungen zu vergleichen.

Das Thermoelement *T* war durch einen seitlichen Ansatz eingeführt. Es konnte vermittelst des Eisenzylinders *E* magnetisch verschoben werden. Die Drähte des Thermoelementes waren so wie aus der Figur zu ersehen gebogen.

Es wurden bei verschiedenen Drucken und bei verschiedenen Stromstärken die Temperatur einmal in der Rohrachse, dann dicht an der inneren Rohrwand bestimmt. Die äußere Rohrwand war durch fließendes Wasser auf einer konstanten Temperatur (ca. 8°) gehalten. Um die Messungen in möglichst reinem Stickstoff ausführen zu können, wurden nur relativ geringe Stromstärken verwendet. Leider sind die Bestimmungen der Temperatur der inneren Rohrwand nur wenig sicher. Wenn die Drähte des Thermoelementes nicht völlig an der Glaswand anlagen, was sich oft nicht vermeiden ließ so waren die gemessenen Temperaturen beträchtlich zu hoch

Tabelle 9.

Stickstoff, Rohr Fig. 14. (Rohrweite 3,7 cm.)

Druck	Stromstärke	Gradient	Watt	Temperatur	
mm	Ampère	Volt/cm		Rohrachse	Rohrwand
0,60	0,086	10,7	0,92	515°	218°
	0,138	10,8	1,49	590	505 (?)
0,34	0,062	7,4	0,46	265	112
	0,155	6,9	1,07	525	435 (?)
0,17	0,070	5,6	0,39	150	60
	0,180	5,4	0,97	375	268
0,09	0,072	3,0	0,22	105	60
	0,175	3,0	0,53	240	105

Führt man Berechnungen an Hand der aus Tabelle 12 zu entnehmenden Zahlenwerte durch, so findet man Abweichungen gegen die experimentellen Bestimmungen. Für die innere Rohrwand ergibt die Berechnung eine Temperatur, welche die der äußeren in keinem Falle der vorstehenden

Tabelle um 2^0 übersteigen könnte. Auch für die Rohrachse sind die berechneten Werte beträchtlich kleiner als die entsprechenden experimentellen Bestimmungen.

Wahrscheinlich trifft die Voraussetzung, die Stromdichte sei im ganzen Rohrquerschnitt konstant, nicht zu. Auch der Einfluß der Rohrwände auf die Entladung ist noch wenig aufgeklärt.[1]) Wie eigenartig übrigens die Verhältnisse unter gewissen Bedingungen sein können, zeigt eine Erscheinung, die ich mehrmals beobachtet habe und auch anderen Herren des hiesigen Instituts demonstrieren konnte. Es zeigte sich nämlich, daß Platindrähte, wie sie als Sonden dienten, zuerst in den den Glaswänden benachbarten Teilen zu glühen begannen, während sie in der Mitte noch nichtleuchtend waren. Die Temperaturverteilung muß also eine allen sonstigen Anschauungen widersprechende gewesen sein. Es gelang leider nicht, die speziellen Bedingungen für die beschriebene Erscheinung festzustellen.

III. Potentialmessungen.

§ 11.

Der Potentialgradient im positiven ungeschichteten Licht ist abhängig von Gasdruck und Gasinhalt, sowie von Rohrweite und Stromstärke. Die hierüber bereits von Hittorf[2]) unternommenen Potentialmessungen wurden wesentlich ergänzt und erweitert durch eine Arbeit von A. Herz.[3]) Herz findet:

Der Potentialgradient im positiven Licht wächst mit wachsendem Drucke.

Der Potentialgradient ist unter sonst gleichen Verhältnissen kleiner in einem weiten Rohr und umgekehrt.

1) Bei den theoretischen Bestimmungen müßte auch das aus der (p. 21) bereits zitierten Arbeit von Lilienfeld sich ergebende Resultat berücksichtigt werden, daß die Leitfähigkeit eines Gases eine bedeutend höhere ist, wenn das Gas ionisiert ist.

2) W. Hittorf, Wied. Ann. **20.** p. 705. 1883.

3) A. Herz, Wied. Ann. **44.** p. 241. 1895.

Der Potentialgradient nimmt geradlinig ab mit wachsender Stromstärke.

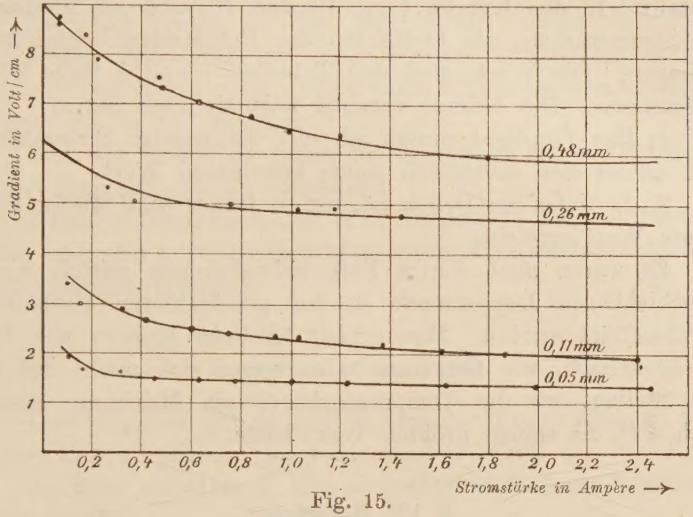

Fig. 15.

In bezug auf den letzten Satz hat bereits Schwienhorst[1]) gezeigt, daß die Abweichungen von der Geraden, namentlich in engen Röhren, wo man über einen größeren Meßbereich in bezug auf Stromdichte verfügt, beträchtlich werden. Es nimmt der Potentialgradient mit zunehmender Stromstärke zuerst rascher, dann langsamer ab. Auch die Versuche von R. Reiger[2]), die namentlich bei sehr tiefen Gasdrucken ausgeführt sind, bestätigen vorstehendes Resultat.

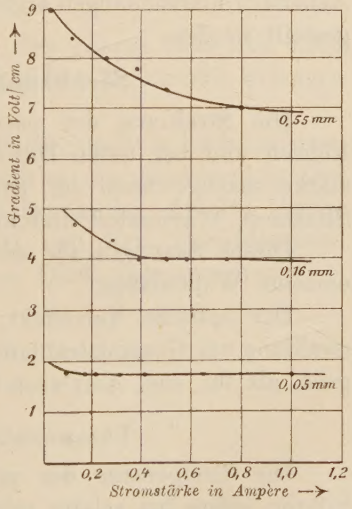

Fig. 16.

Die im folgenden mitgeteilten Potentialmessungen waren gleichzeitig mit Strahlungs- bez.

1) Schwienhorst, Diss. Göttingen 1903.
2) R. Reiger, Habilitationsschrift Erlangen p. 92. 1905.

Temperaturmessungen ausgeführt und sind aus Gründen der Übersichtlichkeit hier in einem eigenen Abschnitt zusammengestellt. In den Kurven Figg. 15 und 16 sind als Abszissen die Stromstärken, als Ordinaten die Potentialgradienten aufgetragen. Die Werte sind den Tabellen 7 und 8 Seite 26 ff. entnommen. Die Kurven ergeben folgende zwei Sätze:

1. Der Gradient nimmt ab mit wachsender Stromstärke und nähert sich allmählich einem konstanten Wert.

2. Je tiefer der Druck ist, um so früher wird dieser konstante Wert erreicht.

Es waren auch einige Potentialmessungen mittels einer verschiebbaren Doppelsonde in der geschichteten Entladung durchgeführt worden. Man erhielt ähnliche Kurven des Potentialverlaufs, wie Graham[1]); es zeigte sich auch, daß an den Stellen, wo die Temperaturkurve ein Maximum besaß, auch dV/dx seinen größten Wert hatte.

§ 12. Resultate.

Die hauptsächlichsten Resultate, die sich aus den vorstehende Untersuchungen ergeben haben, mögen hier zusammengestellt werden.

Strahlungsmessungen.

Die Strahlung des positiven Lichtes wächst in weiten Röhren und bei tiefen Drucken proportional mit der Stromstärke (nachgewiesen für Ströme bis zu einem Ampère an Stickstoff, Wasserstoff und atmosphärische Luft).

Dieser Satz gilt für die Gesamtstrahlung, wie für eine einzelne Wellenlänge.

Der optische Nutzeffekt, d. h. das Verhältnis der Lichtstrahlung zur Gesamtstrahlung, ist für Stickstoff ca. 18 mal so groß, als für eine Amylacetatlampe.

Temperaturmessungen.

Die Temperatur des positiven Lichtes kann in weiten Röhren schon bei relativ schwachen Strömen 1000° und darüber betragen.

1) W. F. Graham, Wied. Ann. 64. p. 49. 1898.

Im positiven Licht ist die Temperatur angenähert proportional dem Produkt aus Stromstärke und Spannungsabfall.

Die Temperatur in den leuchtenden Teilen einer geschichteten Entladung ist höher als die Temperatur in den dunklen Zwischenräumen. Diese Unterschiede können in weiten Röhren bis zu 50° betragen.

Von der Rohrachse gegen die Rohrwand ist ein beträchtlicher Temperaturabfall vorhanden.

Zwischen den nach der Warburgschen Theorie berechneten und den experimentell bestimmten Temperaturen dürften Abweichungen bestehen.

Potentialmessungen.

Der Gradient nimmt mit wachsender Stromstärke ab und nähert sich allmählich einem konstanten Wert.

Je tiefer der Druck, um so früher wird dieser konstante Wert erreicht.

Vorstehende Arbeit wurde in den Jahren 1905 und 1906 im physikalischen Institut der königlichen Universität Erlangen ausgeführt.

Es ist mir eine angenehme Pflicht, meinem hochverehrten Lehrer Hrn. Prof Dr. E. Wiedemann für die Anregung und vielfache Unterstützung bei Ausführung der Arbeit, ebenso auch Hrn. Prof. Dr. A. Wehnelt und Hrn. Privatdozenten Dr. R. Reiger meinen ergebensten Dank auszusprechen.